

Electr.

ÉTUDE
DES
COURANTS FARADIQUES

A L'AIDE DU GALVANOMÈTRE
ET DE L'ÉLECTRODYNAMOMÈTRE

DISSERTATION INAUGURALE

PRÉSENTÉE

A

LA HAUTE FACULTÉ DE MÉDECINE

DE L'UNIVERSITÉ DE BERNE

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR

ROBERT DINICHERT,

MÉDECIN

BERNE

IMPRIMERIE KARL STÄMPFLI & CIE.

1893

ÉTUDE
DES
COURANTS FARADIQUES
A L'AIDE DU GALVANOMÈTRE
ET DE L'ÉLECTRODYNAMOMÈTRE

DISSERTATION INAUGURALE
PRÉSENTÉE
A
LA HAUTE FACULTÉ DE MÉDECINE
DE L'UNIVERSITÉ DE BERNE
POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR EN MÉDECINE

PAR
ROBERT DINICHERT,
MÉDECIN

BERNE
IMPRIMERIE KARL STÄMPFLI & CIE.
1893

*L'impression de la présente thèse a été autorisée par
la faculté de médecine sur la proposition de M^r le Prof.
D^r Kronecker.*

Berne, le 31 mai 1893.

Le doyen,
H. STRASSER.

A MES PARENTS

HOMMAGE DE PROFONDE GRATITUDE





Digitized by the Internet Archive
in 2026

Les appareils d'induction, grâce à la facilité de leur maniement, peuvent être placés dans toutes les mains. Les garde-malades, les malades eux-mêmes, après quelques séances, parviennent à s'en servir; le médecin qui en fait fréquemment usage dans un but thérapeutique s'en sert, le plus souvent, sans chercher à approfondir les phénomènes variés dont ces appareils sont le siège.

Tout autre est la situation lorsque, dans des recherches cliniques ou physiologiques, on cherche à constater de légères perturbations de l'excitabilité nerveuse ou musculaire. Dans ces cas, où l'on compare ordinairement la réaction de 2 nerfs symétriques, il serait désirable de pouvoir donner à l'excitant une valeur précise. En abordant ce sujet, on s'aperçoit que rien n'est plus compliqué qu'un appareil d'induction.

Dans ceux dont on fait usage en médecine, on trouve mélangés les phénomènes d'induction mutuelle, de selfinduction, d'induction par les aimants; la graduation s'opère tantôt par le rapprochement des bobines, tantôt par l'introduction dans la bobine primaire d'un noyau de fer doux, enfin par le tube de Duchenne.

Outre ces moyens de graduation, il faut tenir compte des variations de courant dépendant de la résistance du circuit, des phénomènes de selfinduction naissant dans les hélices mêmes des appareils, ou produits par l'intercalation des instruments de mesure.

On peut trouver épars dans les traités de physique les lois qui régissent ces phénomènes, on y trouve même quelques expériences physiologiques, faites le plus souvent sans précision suffisante, l'indication de faits constatés par les physiologistes, mais il est rare de trouver réunis l'exposé d'expériences physiologiques et la relation de mesures physiques, et pourtant il serait nécessaire au médecin physiologiste de connaître les qualités des courants qu'il emploie, de savoir exactement ce qui se passe lorsqu'il recourt à tel ou tel moyen de graduation des courants. Il serait utile d'avoir à ce sujet des mesures et cela dans les conditions mêmes où les courants sont appliqués en électrothérapie.

C'est dans cette intention que nous avons institué un certain nombre d'expériences, destinées à spécifier l'action physiologique produite par les appareils d'induction médicaux, en appliquant à ces courants des mesures galvanométriques et électrodynamométriques.

Dans le courant de ces démonstrations, il nous arrivera souvent de prouver par des expériences des lois qui, pour le physicien, sont évidentes; on nous pardonnera d'insister sur des faits qui paraissent acquis, de confirmer par des mesures, par des chiffres, l'énoncé de lois connues.

En physique, on ne connaît bien que ce que l'on a mesuré.

Nous bornerons nos recherches à des appareils médicaux et tâcherons d'exposer clairement les phénomènes variés, qui surgissent pendant l'application des courants induits sur le corps; nous chercherons à préciser la relation qui existe entre l'effet physiologique et les qualités physiques des courants, que décèle l'emploi successif du galvanomètre et de l'électrodynamomètre.

Rappelons d'abord les lois les plus simples de l'induction. Supposons une bobine primaire sur laquelle nous pouvons fermer le courant d'un élément galvanique. Dans le circuit d'une bobine secondaire, emboîtée sur la première, la fermeture et l'ouverture du circuit primaire induiront des courants d'induction.

Ces courants sont, à proprement parler, des *décharges*, c'est-à-dire qu'à la *fermeture* du circuit in-

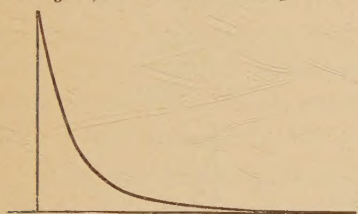


Fig. I.

ducteur une *certaine quantité d'électricité* est lancée dans le circuit secondaire, quantité qui s'écoule rapidement, sans reproduction possible du potentiel initial. Cette décharge se fait suivant une courbe asymp-

totique (fig. I) comme celle des décharges de condensateurs.

Dans le cas de l'induction simple, et si nous faisons abstraction pour le moment de tout autre phénomène, nous nous trouvons en présence des conditions suivantes: à la fermeture du circuit primaire le courant inducteur s'élève rapidement de l'intensité 0 à une intensité x , proportionnelle à la force électromotrice, inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit; ce temps très court constitue la *période d'état variable ascendant* du courant inducteur, et c'est pendant cette période que se passe dans le circuit induit le phénomène d'induction qui donne lieu à la *décharge de fermeture*. Pendant la *période de régime permanent*, où le courant inducteur conserve son intensité normale, aucun phénomène ne se passe dans le circuit secondaire; par contre, à l'ouverture, l'intensité du courant inducteur tombe de x à 0, traversant encore une *période d'état variable*

descendant, et cette variation d'intensité jette de nouveau dans le circuit induit une certaine quantité d'électricité, *décharge d'ouverture*. Ces phénomènes sont résumés dans le schéma ci-joint (fig. II). Nous avons donc, au

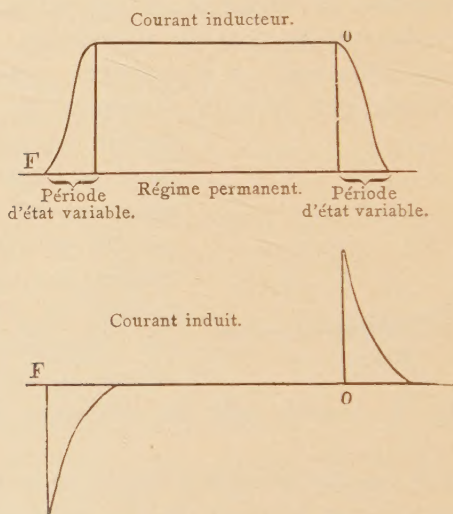


Fig. II.

moment de la fermeture du circuit inducteur, une décharge d'induction dans le circuit secondaire; cette décharge est de sens inverse au courant qui lui donne naissance; elle est souvent désignée sous le nom de *courant inverse*. A l'ouverture, nous avons une nouvelle décharge, mais de même sens que le courant producteur, le *courant d'ouverture* ou *direct*. Déjà dans ces conditions, l'analyse de ces décharges d'induction est un peu compliquée, et nous avons avant tout à tenir compte de 2 de leurs qualités: la *quantité* et l'*intensité*. Il importe de bien définir ces deux termes.

Pour un courant galvanique arrivé à sa période de régime permanent et gardant une intensité constante

pendant un temps donné, la *quantité est le simple produit de l'intensité par le temps*. $Q = It$.

Mais pour les décharges (condensateurs, appareils d'induction), l'intensité variant d'un instant à l'autre, c'est un produit différentiel exprimé par $Q = \int I dt$; elle se mesure facilement à l'aide du galvanomètre balistique. Cette quantité ainsi mesurable est absolument l'analogue de l'intensité des courants galvaniques, elle est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la force électromotrice, exprimée dans le cas spécial par le nombre des tours de la bobine, inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit.

Les mesures au galvanomètre démontrent que l'ouverture et la fermeture du courant primaire jettent dans le circuit secondaire des *quantités égales* d'électricité, puisqu'en lançant isolément sur cet instrument les décharges de fermeture et d'ouverture nous obtenons des déviations égales.

Un coup d'œil jeté sur la formule $Q = \int I dt$ montre qu'on peut, tout en laissant Q constant, faire varier I si l'on a soin d'imprimer à t des variations en sens inverse. La quantité peut rester la même si I est grand et t petit, ou vice-versa, c'est-à-dire que la même quantité d'électricité peut s'écouler en un temps très court, en un flux de grande intensité, ou se dissiper lentement avec une faible intensité.

Ce phénomène se présente souvent dans les appareils d'induction ordinairement employés en médecine, où l'induction est due tant à la fermeture et à l'ouverture du courant inducteur qu'à la naissance et à la disparition de l'aimantation d'un noyau de fer doux, contenu dans la bobine primaire.

Dans ces conditions de double induction, nous voyons le courant de fermeture, quoique ayant même

quantité que celui d'ouverture, produire des effets physiologiques beaucoup moindres par le fait qu'il a moins d'intensité. Dans le schéma précédent, en effet (fig. II, nous avons attribué la même valeur aux périodes d'état variable ascendant et descendant, et nous en avons conclu que les décharges d'induction dans le circuit secondaire avaient à tous égards la même forme, mais en réalité il n'en est pas ainsi. A la fermeture, le courant inducteur n'atteint pas aussi librement son intensité maximale, que le ferait croire notre schéma. L'établissement du courant détermine, dans les spires mêmes de la bobine primaire, un phénomène de selfinduction (extra courant de fermeture) qui empêche le courant inducteur d'atteindre aussi rapidement qu'il le ferait sans cet obstacle, son intensité maximale, et prolonge ainsi la période d'état variable ascendant. Nous verrons que d'autres facteurs (induction mutuelle de circuits voisins, courants de Foucault) peuvent agir de la même façon.

A l'ouverture également, le courant ne cesse pas d'une manière absolument brusque. Il se produit à l'ouverture un nouveau courant (extra-courant d'ouverture), de même sens que le courant inducteur, et qui, si le circuit n'était pas en même temps rompu, prolongerait lui aussi la période d'état variable d'ouverture en diminuant la brusquerie de la chute d'intensité. En fait, la rupture n'est pas complète à la séparation des contacts, car l'extra-courant produit une vive étincelle, volatilisant les métaux à leurs points de contact; cette étincelle étant conductrice prolonge également la durée de la période d'état variable descendant, dans de plus faibles proportions cependant que pour le courant de fermeture.

A la période d'état variable ascendant prolongée correspond une décharge induite de fermeture plus aplatie,

d'intensité moindre, mais de durée plus longue. La décharge d'ouverture, moins contrariée par les phénomènes de selfinduction dont la bobine primaire est le siège, conserve une *haute tension*, c'est-à-dire en fonction de la résistance, une *haute intensité*, mais a une *durée moindre*. L'aire des deux courbes reste la même, elle indique la *quantité* mesurable au galvanomètre comme

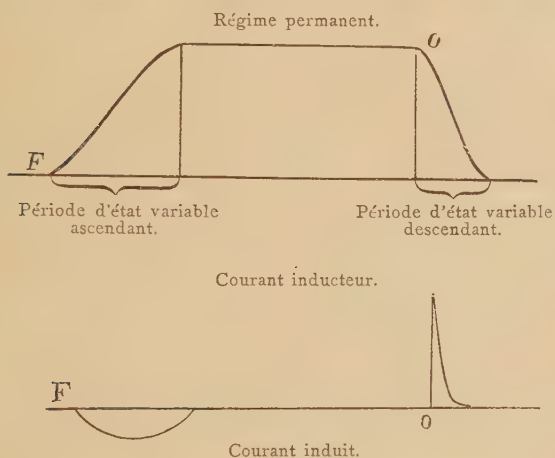


Fig. III.

nous l'avons vu. Cet instrument déviant à gauche et à droite suivant le sens des courants, ces mesures ne peuvent se faire qu'au moyen de fermetures et d'ouvertures isolées, et, malgré la forme différente de leurs courbes, ces deux décharges donnent des déviations égales.

Exemple: La bobine secondaire étant placée à 80 millimètres de l'emboîtement complet, nous obtenons: 148 divisions à la fermeture, 148 à l'ouverture du courant primaire, et, cependant, l'effet physiologique est plus fort à l'ouverture.

Notons en passant que ce que nous venons de dire ne s'applique qu'au cas d'un circuit de résistance stable; l'expérience a démontré, en effet, que, lorsque le corps humain est interposé dans le circuit, les déviations sont beaucoup plus grandes pour le courant d'ouverture que pour celui de fermeture.¹

Quant à l'*intensité*, elle ne peut se mesurer au galvanomètre, puisque celui-ci n'indique que la quantité: il faut pour cela recourir à l'électrodynamomètre.

Cet instrument se compose de deux bobines cylindriques dont les axes sont perpendiculaires. L'une est fixe; l'autre, mobile, est suspendue à un fil métallique qui sert à lui amener le courant. Ces deux bobines sont traversées par le même courant, et les *tangentes des angles de déviation sont proportionnelles aux carrés des intensités*. $I^2 = \operatorname{tg} \alpha$.

La déviation ne change pas avec le sens du courant; l'électrodynamomètre est donc applicable à la mesure des courants alternatifs, comme ceux que produisent les fermetures et ouvertures successives des appareils d'induction munis de leur trembleur automatique. Il faut enfin remarquer que cet instrument ne mesure réellement une intensité que dans le cas d'un courant continu et constant. Quand les courants ont une intensité variable d'un instant à l'autre, comme dans le cas de décharges de forme asymptotique, il mesure: la *racine carrée de la moyenne des carrés de l'intensité du courant*, valeur représentée par le symbole $[\overline{I^2}]$ moy.

L'emploi simultané ou successif du galvanomètre balistique et d'un électrodynamomètre approprié constitue donc un excellent moyen de nous renseigner sur

¹ Dr Stauffer. Etude sur la quantité des courants d'induction employés en électrothérapie. Thèse de Berne, 1890.

les qualités physiques des courants induits, et d'analyser les conditions qui font varier leur effet physiologique.

Consacrons d'abord quelques mots à la description des 2 appareils dont nous avons fait usage dans ces expériences. Notre galvanomètre est un instrument assez sensible, gradué en centièmes de milliampères pour la lecture directe; l'aimant, en forme de fer à cheval, est suspendu à un fil de cocon et se meut dans un bloc de cuivre destiné à en amortir les oscillations. Le fil de suspension porte une aiguille horizontale, indiquant les déviations en milliampères et un miroir permettant de faire la lecture des déviations à distance, au moyen d'une lunette appropriée, placée ordinairement à 2.80 mètres du miroir galvanométrique. La résistance du galvanomètre est en chiffres ronds de 5000 ohms. Employé pour les courants galvaniques, 70 divisions représentent $\frac{1}{100}$ de milliampère. Une division représente environ $\frac{1.5}{10000}$ de milliampère.

Employé balistiquement à son maximum de sensibilité, 6 divisions correspondent à un microcoulomb. Il serait donc facile d'exprimer en unités, microcoulombs, la quantité des décharges de condensateurs ou de courants d'induction en divisant par 6 les déviations obtenues.

Pour la mesure de l'intensité, nous nous sommes servi d'un électrodynamomètre construit par le Dr Dubois sur le modèle de celui de Weber, mais à suspension unifilaire. Un fil d'argent de 0.05 millimètre de diamètre et de 30 centimètres de longueur sert de fil de suspension et amène le courant à la bobine mobile, de 800 tours de fil de cuivre de 0.1 millimètre. Par l'intermédiaire d'une tige de zinc amalgamé, le fil terminal plonge dans une solution concentrée de sulfate de zinc; de là une tige de zinc amalgamé amène le courant à la bobine fixe

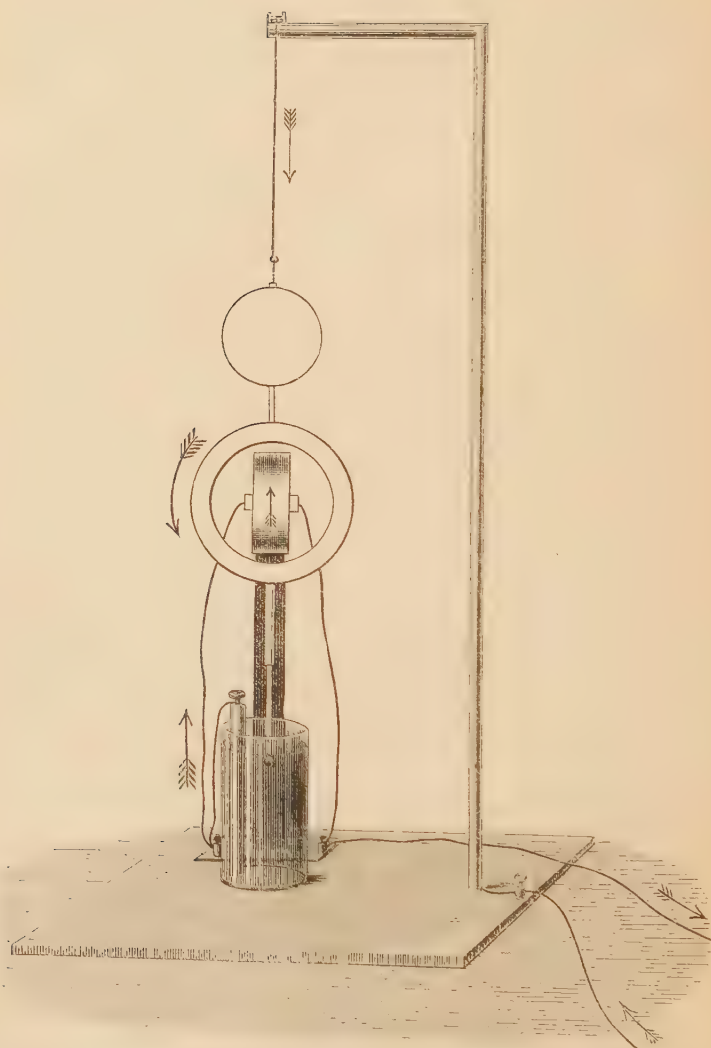


Fig. IV.

de 950 tours. La fig. IV donne une vue générale de notre instrument. Dans toutes les expériences, l'interposition du contact liquide impolarisable (zinc et zinc amalgamés dans sulfate de zinc) s'est montrée sans inconvénients; nous n'avons jamais constaté l'existence de courants de polarisation gênant l'observation. L'instrument, d'une résistance de 280 ohms, est suffisamment sensible pour nos besoins, puisqu'il mesure par des déviations de 100 divisions et plus, des courants produisant la contraction minimale chez l'homme. La lecture se fait également au miroir à une distance de 2.⁸⁰ mètres. Le seul inconvénient de l'instrument est que, n'ayant pour être maintenu dans sa position normale que la torsion du fil et le frottement de la tige dans la solution de sulfate de zinc, le miroir ne revient pas toujours aussi exactement au 0 que pour le galvanomètre. Il est cependant possible d'arriver à des résultats d'une précision très suffisante.

Nous avons, au moyen de ces deux instruments de mesure, étudié les modifications que les divers procédés, dont on peut faire usage pratiquement pour faire varier les effets des courants d'induction, apportent à la forme des décharges, déterminé ceux qui modifient à la fois l'intensité et la quantité, ceux qui sans toucher à la quantité font varier l'intensité, nous avons cherché à saisir, en un mot, les conditions qui font varier l'effet de ces courants, particulièrement au point de vue des effets physiologiques.

Résumons ces procédés de graduation.

On peut modifier les effets physiologiques des courants induits :

- 1° En augmentant ou en diminuant l'intensité du courant inducteur.

- 2° En emboîtant plus ou moins la bobine induite sur la bobine inductrice.
- 3° En faisant varier les conditions de résistance du circuit induit (rhéostat dans le circuit).
- 4° En faisant varier le nombre des tours des bobines.
- 5° En introduisant dans l'intérieur de la bobine primaire un noyau de fer doux.
- 6° En introduisant entre la bobine primaire et secondaire le tube de cuivre imaginé par Duchenne et Dove (graduateur ou écran d'induction).
- 7° En rendant les ruptures plus brusques, soit par l'interruption au mercure sous couche d'alcool, soit par l'intercalation d'un condensateur en dérivation des points de rupture.

Qu'on nous permette d'ajouter quelques mots sur l'appareil d'induction que nous avons employé pour nos expériences.

La bobine primaire est faite d'un fil de cuivre de 0.8 millimètre de diamètre, elle a 1100 tours et une résistance de 3.87 ohms. Elle contient dans sa cavité un faisceau de fils de fer doux que nous pouvons enlever à volonté et remplacer par un barreau de fer. Nous disposons de 2 bobines secondaires. L'une, faite de 10,050 tours d'un fil de cuivre de 0.2 millimètre, a une résistance de 1000 ohms; l'autre, faite de 2218 tours d'un fil d'un diamètre de 0.8 mm., n'a que 18 ohms de résistance. Dans l'exposé de nos expériences, il s'agira toujours de l'appareil d'induction dont nous venons de parler, quand nous ne donnerons pas d'autre indication. Nous appellerons bobine à fil fin celle ayant 10,050 tours, bobine à gros fil celle ayant 2218 tours. Le courant inducteur est fourni le plus souvent par 4 éléments Daniell.

Reprenant successivement chacun des 7 moyens de graduation indiqués page 15 et 16, nous énoncerons les propositions qui s'y rapportent et nous les démontrerons à l'aide d'une expérience résumant les nombreuses mesures que nous avons effectuées.

PREMIÈRE PROPOSITION.

La quantité et l'intensité des courants induits sont, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelles à l'intensité du courant inducteur.

Quoiqu'il soit presque superflu de démontrer expérimentalement cette proposition, nous tenons à indiquer les mesures que nous avons faites, car elles montrent clairement cette proportionnalité. L'exactitude des résultats nous prouve aussi que notre électrodynamomètre fonctionne convenablement. Un coup d'œil jeté sur le tableau suivant ne peut laisser subsister aucun doute à ce sujet :

Nombre des éléments	Intensité mesurée du courant inducteur	Déviation galvanométriques donnant la quantité du courant induit	$\sqrt{\text{des déviations dynamométriques donnant l'intensité du courant induit}}$
4	0.150 ampère	136	13.92
3	0.130 »	118	11.70
2	0.106 »	94	9.79
1	0.062 »	53	5.88

Il est inutile de démontrer que cette augmentation d'intensité du courant inducteur, qui fait croître à la fois la *quantité* et l'*intensité* de l'induit, rend aussi l'effet physiologique plus grand. La conséquence pra-

tique de cette loi est que, si l'on veut donner à l'induit une constance relative, il faut avant tout s'assurer de la constance du courant inducteur. Il faut donc, dans des recherches précises, faire usage de Daniells bien entretenus ou interposer dans le circuit primaire un galvanomètre (ampèremètre) qui permette de s'assurer de l'intensité du courant inducteur. C'est à ce dernier moyen que von Ziemssen et Edelmann ont eu recours pour leur appareil d'induction étalonné qu'ils ont nommé faradimètre, mais comme ils ont fait usage de piles inconstantes (pile Poggendorf ou Grenet, forme bouteille), la précision est moins grande qu'avec des Daniells qui supportent sans polariser la fermeture sur un circuit de faible résistance.

DEUXIÈME PROPOSITION.

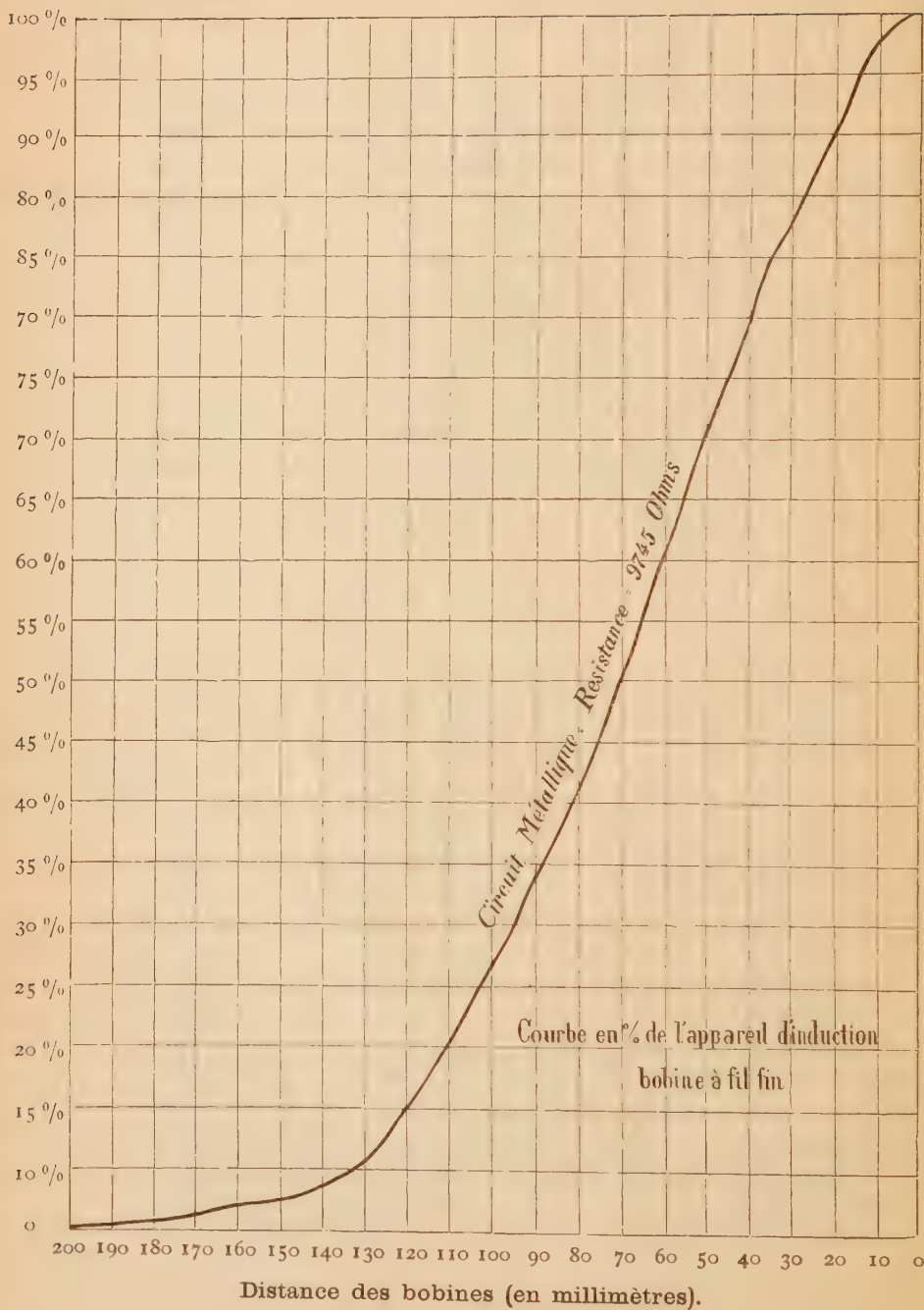
Le rapprochement des bobines produit, toutes choses égales d'ailleurs, une augmentation parallèle de la quantité et de l'intensité des courants induits.

Comme la première, cette proposition ne paraît pas avoir besoin d'être démontrée; cependant, l'on trouve dans divers auteurs des affirmations contraires et on s'est donné beaucoup de peine pour graduer les appareils à chariot à l'aide d'instruments délicats et d'un maniement peu commode, l'électromètre et l'électrodynamomètre (faradimètre de von Ziemssen et Edelmann). Or, si l'on sait que par le rapprochement des bobines on augmente, dans la même proportion, la *force électromotrice*, l'*intensité* et la *quantité*, on recourra pour la graduation des appareils à des procédés de mesure plus simples; le galvanomètre balistique suffit amplement pour cette détermination.

Il est donc utile, après ce que nous venons de dire, de montrer, à l'aide de quelques chiffres, les modifications parallèles que subissent la *quantité* et l'*intensité* par le rapprochement des bobines. Le tableau suivant donne la quantité et l'intensité en % de leur maximum pour les divers degrés d'écartement des bobines. Il est facile de voir que les chiffres sont aussi concordants qu'ils peuvent l'être pour des mesures effectuées successivement sur les deux instruments.

Distance de la bobine secondaire	% de l'intensité mesurée à l'électrodynamomètre	% de la quantité mesurée au galvanomètre balistique
130 millim.	6.38	6.79
120 »	11.89	10.87
110 »	17.96	16.96
100 »	26.42	23.30
90 »	32.88	31.06
80 »	41.44	40.29
70 »	49.84	48.05
60 »	60.06	56.31
50 »	67.71	68.73
40 »	77.08	77.67
30 »	84.54	84.46
20 »	92.15	92.23
10 »	98.07	98.05
0 »	100	100

Rappelons ici que si la *tension* du courant induit, sa *quantité*, son *intensité*, subissent par le rapprochement des bobines des augmentations parallèles, il ne faut pas en inférer que ces augmentations soient mesurées par les distances en millimètres des deux hélices.



Aussi longtemps qu'elles sont à distance l'une de l'autre, le rapprochement de plusieurs centimètres ne produit que des augmentations insignifiantes du courant induit. Ce n'est qu'à partir de l'emboîtement des bobines (dans notre instrument à 150 millimètres) que l'intensité croît plus rapidement.

Nous empruntons à la thèse du D^r Stauffer la courbe ci-jointe (p. 20) de la quantité du courant en % de la quantité maximale.

D'après notre proposition n° 2, nous pouvons dire que cette courbe est la même pour la tension, pour l'intensité et pour la quantité. Il en résulte que pour la graduation de leur faradimètre von Ziemssen et Edelmänn auraient pu éviter de recourir à l'emploi de l'électromètre. Qu'on se serve de l'électromètre, du galvanomètre ou de l'électrodynamomètre, on retrouvera toujours cette courbe caractéristique; et la graduation en microcoulombs proposée par Gaiffe à Paris est tout aussi exacte que celle en volts du faradimètre. Elle est tout aussi exacte, mais tout aussi insuffisante, puisque la quantité et l'intensité varieront en proportion inverse des résistances inconnues du circuit aussitôt que le corps est interposé.

TROISIÈME PROPOSITION.

En vertu de la loi de Ohm, l'intensité et la quantité des courants induits doivent être inversement proportionnelles à la résistance totale du circuit; mais il y a lieu de faire ici une importante distinction.

Pour le galvanomètre, la *résistance vraie*, mesurable en ohms (résistance ohmique de certains auteurs), est la seule qui entre en jeu. Qu'un courant induit de fermeture ou d'ouverture traverse une résistance de 1000 ohms, il

donnera au galvanomètre balistique une déviation x ; cette déviation restera la même que la résistance soit un solénoïde donnant lieu à des phénomènes de self-induction ou qu'elle soit un rhéostat à enroulement bifilaire où la selfinduction devient négligeable. Par contre, l'électrodynamomètre décèle toutes les variations d'intensité; non seulement celles que détermine la présence d'une résistance ohmique dans le circuit, mais encore celles qui résultent de la naissance d'un contre-courant (extra-courant) de selfinduction, constituant une *résistance apparente*.

Nous allons en donner quelques exemples.

Nous lançons sur le galvanomètre les courants induits de fermeture ou d'ouverture, la bobine secondaire à gros fil étant à 0 (emboîtement complet). Nous intercalons dans le circuit des *résistances non inductives* variables et des *solénoïdes* de résistance connue.

Le tableau suivant donne les déviations galvanométriques; le signe $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$ indiquant les résistances non inductives, le signe $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$ les résistances solénoïdes.

Résistances intercalées dans le circuit	Résistance totale	Déviations galvano- métriques
5000 (galvanomètre)	5,000	92
5000 » + 406 $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$	5,406	84
5000 » + 406 $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$	5,406	84
5000 » + 1,000 $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$	6,000	75
5000 » + 1,000 $\text{v}\text{v}\text{v}\text{v}$	6,000	75
5000 » + 2,000 »	7,000	64
5000 » + 3,000 »	8,000	56
5000 » + 5,000 »	10,000	45
5000 » + 10,000 »	15,000	30
5000 » + 20,000 »	25,000	18
5000 » + 30,000 »	35,000	15

Il est facile de voir tout d'abord que le galvanomètre donne absolument les mêmes déviations 84 et 75, que les résistances intercalées soient inductives ou non. On constate, en outre, que la quantité est inversement proportionnelle à la résistance du circuit.

$$\text{Exemple: } \frac{10,000}{25,000} = \frac{18}{45}$$

Tout autre sera le résultat si nous nous servons de l'électrodynamomètre pour la mesure de l'intensité.

Intercalons dans le circuit une résistance de 1000 ohms *non inductive*; la bobine secondaire étant placée à 136 mm., nous obtenons une intensité de 14.31
à 145 » » » » » » 10.29

Remplaçant maintenant cette résistance  par une résistance *solénoïde* de 1000 ohms, la bobine secondaire étant placée aux mêmes distances, c'est-à-dire à 136 mm., nous obtenons une intensité de 4.58
à 145 » » » » » » 3.24

L'intensité est donc dans cette expérience 3 fois moins grande quand la résistance de 1000 intercalée dans le circuit est un solénoïde.

Nous avons répété ces expériences avec d'autres solénoïdes de résistance ohmique différente et nous avons toujours obtenu les mêmes résultats.

Nous sommes ici en présence de phénomènes de selfinduction. La diminution de l'intensité n'est pas la conséquence d'une augmentation de la résistance mesurable en ohms, mais de la naissance d'un contre-courant produit par la selfinduction.

Nous pouvons conclure de cette expérience comparée à celle faite à l'aide du galvanomètre que l'intercalation de résistances inductives réduit l'intensité beaucoup plus que la quantité. La *quantité* est, toutes

choses égales d'ailleurs, inversement proportionnelle à la *résistance ohmique* du circuit, l'*intensité* est inversement proportionnelle à la somme des résistances ohmique et apparente (de selfinduction).

Les effets physiologiques varient aussi suivant la nature des résistances. Un courant d'induction traversant un solénoïde intercalé dans le circuit, produit des effets physiologiques beaucoup moins intenses, que lorsque la résistance est **non inductive**.

Nous avons énoncé plus haut que l'intensité et la quantité sont inversement proportionnelles à la résistance totale du circuit. Après les considérations que nous venons d'exposer, il est évident que nous ne pouvons constater ce parallélisme qu'en intercalant des résistances non inductives. Nous avons essayé avec différents rhéostats qui semblaient de bonne construction, mais nous avons constaté que toutes ces résistances n'étaient pas exemptes de selfinduction et donnaient des résultats irréguliers. C'est pour éviter ces inconvénients que nous avons eu recours à des résistances liquides, quoique leur valeur ohmique ne soit pas absolument constante.

Le rhéostat dont nous nous sommes servis se compose d'un tube de verre recourbé en U rempli d'une solution de sulfate de zinc à 5 %. Dans chacune des branches plonge une tige métallique, recouverte d'un vernis isolant, et munie à son extrémité inférieure d'une boule de zinc amalgamé. Ces tiges, au moyen d'une crémaillère graduée en centimètres, peuvent être abaissées ou élevées, ce qui permet de diminuer ou d'augmenter graduellement la résistance.

Ce rhéostat impolarisable étant intercalé dans le circuit, nous lisons à l'électrodynamomètre les déviations correspondant à différentes résistances qui ont

été déterminées aussi exactement que possible par la méthode du pont de Wheatstone.

Résistance totale du circuit	Intensité du courant induit
19,500	2.44
18,300	2.62
16,600	3.00
14,900	3.31
12,700	3.46
10,500	4.65
8,500	5.47
6,500	7.07
4,000	10.44

Nous constatons facilement qu'il y a proportionnalité inverse entre la résistance et l'intensité.

Exemple: $\frac{10,500}{19,500} = \frac{2.44}{x} = 4.53$, intensité très voisine de l'intensité 4.65 obtenue expérimentalement.

Nous avons déjà démontré plus haut que la quantité est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit; nous trouvons le même résultat pour l'intensité, d'où nous concluons que l'intercalation de résistances non inductives diminue *parallèlement* la quantité et l'intensité. Rappelons encore une fois qu'il n'en serait pas de même s'il s'agissait de solénoïdes.

QUATRIÈME PROPOSITION.

La tension et, par conséquent, la quantité des courants induits croît, toutes choses égales d'ailleurs, avec le nombre de tours des deux bobines.

On serait tenté d'admettre qu'il en est de même pour l'intensité, et c'est ce que l'on sousentend quand

on dit que les effets physiologiques sont d'autant plus intenses que le circuit secondaire renferme un plus grand nombre de spires. Il y a lieu de faire ici d'importantes restrictions.

Tout d'abord, pour ce qui concerne la bobine primaire, nous ne pouvons dépasser un certain nombre de tours, car, si, en multipliant les tours, nous augmentons les effets d'induction, d'un autre côté la résistance du circuit primaire croît, et on serait forcé d'augmenter la force électromotrice de la pile, de prendre un plus grand nombre d'éléments, ce qui serait peu pratique, surtout quand il s'agit d'appareils médicaux.

Suivant la loi de Becquerel, qui dit que l'effet maximum est obtenu quand la résistance intérieure est égale à la résistance extérieure, on construit généralement les bobines primaires à l'aide de gros fil; elles ont, par conséquent, un nombre de tours assez peu considérable.

Pour la bobine secondaire, on a souvent prétendu qu'on pouvait élever à volonté le nombre des tours, accroître indéfiniment par là l'action physiologique; en effet, le courant induit se ferme dans les conditions ordinaires de l'électrothérapie sur des résistances considérables de 1000 ohms et plus, il semble donc qu'on pourrait augmenter le nombre des spires jusqu'à ce que la résistance intérieure de la bobine égale la résistance extérieure. L'expérience physiologique démontre qu'il n'en est point ainsi, le fait a été clairement démontré par le Dr Dubois,¹ dans son travail sur la selfinduction en physiologie.

L'intercalation de solénoïdes dans le circuit du courant d'induction diminue beaucoup l'effet physiolo-

¹ Congrès de Berlin, 1890. Dr Weil: « Ueber Inductionsströme fein- und grobdrähtiger Spulen. » Thèse de Berne, 1891.

gique de ce dernier, car ces solénoïdes représentent une *résistance apparente* bien supérieure à leur résistance ohmique. Ainsi, dans une expérience faite sur le nerf médian, le D^r Dubois a constaté qu'un solénoïde de 1030 ohms diminuait l'action physiologique comme 15,000 ohms environ. Cette influence sur l'intensité reste la même, qu'il s'agisse de solénoïdes surnuméraires intercalés dans le circuit, ou que le solénoïde soit constitué par la bobine productrice du courant. L'existence de cette selfinduction peut, suivant les conditions de résistance du circuit (corps humain), diminuer considérablement l'intensité que l'on aurait cru devoir être proportionnelle au nombre des tours. Nous voyons alors des bobines à gros fil d'une tension relativement minime donner des effets physiologiques beaucoup plus intenses que des hélices secondaires à nombreux tours de fil. La différence est telle qu'une bobine à gros fil de 2218 tours produit des secousses plus insupportables qu'un Ruhmkorff de grand modèle qui, à la décharge disruptive, donne des étincelles de 30 centimètres.

Duchenne (de Boulogne) avait indiqué ces différences entre les bobines à fil fin et les bobines à gros fil, particulièrement entre les bobines secondaire et primaire, et il a maintenu son dire malgré les objections qu'on lui a faites. Les constructeurs français ont continué à tenir compte de ces différences d'action des bobines à fil fin et à gros fil; mais l'explication qu'on en a donnée est fausse. On a attribué au courant des bobines à gros fil une *plus grande quantité*, c'est faux, le calcul et le galvanomètre le démontrent.

Si, fermé sur des résistances moyennes, le courant de la bobine à gros fil a l'avantage, c'est qu'il a, malgré sa tension moindre (nombre de tours), malgré sa quantité inférieure (galvanomètre), une *intensité moyenne plus*

grande. Il la doit au peu de développement de la self-induction dans des bobines à tours de fil peu nombreux.

Pour de plus amples détails sur ce sujet, nous renvoyons aux ouvrages cités. Nos mesures électrodynamométriques confirment ces vues; nous avons constaté, en effet, que l'électrodynamomètre décèle également des diminutions de l'intensité qui résultent de la selfinduction. Un circuit dans lequel se produisent des phénomènes de selfinduction a, par conséquent, une résistance apparente plus grande que sa résistance ohmique.

Si la résistance extérieure sur laquelle on ferme le courant est très considérable (pinceau électrique), les résistances *ohmique* et *apparente* de la bobine comptent pour peu de chose et la bobine à fil fin conserve la prédominance qu'elle doit à ses nombreux tours de spires. Au contraire, si le courant est appliqué sur le corps à l'aide d'électrodes à grande surface, bien humectées, la résistance extérieure est peu considérable et la bobine à fil fin perd de son efficacité en raison de sa résistance intérieure (résistance vraie et apparente de selfinduction) trop considérable. Ce n'est donc que dans le cas de grande résistance extérieure dans le circuit, ou pour obtenir des étincelles disruptives qu'on peut à volonté multiplier le nombre des tours de la bobine secondaire.

Pour obtenir les effets physiologiques recherchés en électrothérapie, il y a le plus souvent avantage à prendre des bobines à gros fil, de tension modérée, mais qui sont le siège de phénomènes moins intenses de selfinduction.

CINQUIÈME PROPOSITION.

La présence d'un électro-aimant dans l'intérieur de la bobine primaire modifie à la fois la quantité et l'intensité moyenne des courants induits, mais dans des proportions différentes.

Les traités d'électrothérapie sont généralement peu clairs à ce sujet et énoncent simplement que la présence d'un noyau de fer dans la bobine primaire augmente la *force* (?) du courant sans donner d'autres explications sur l'influence qu'elle peut avoir d'un côté sur la quantité de l'autre sur l'intensité.

Nous pouvons démontrer à l'aide de nos deux instruments de mesure les modifications que subissent la *quantité* et l'*intensité* par l'adjonction d'un électro-aimant au courant inducteur.

Nous intercalons dans le circuit induit notre galvanomètre et déterminons l'augmentation que subit la quantité lorsqu'on introduit dans la bobine primaire un barreau de fer doux.

Distance de la bobine secondaire à fil fin	Déviation avec le barreau de fer doux	Déviation sans barreau	Pouvoir multiplicateur du barreau
130	40	2	20
120	64	3.25	19.6
110	93	5	18.6
100	132	7	18.8
90	172	9	19.1

Nous obtenons le pouvoir multiplicateur du barreau de fer doux en divisant les déviations obtenues avec le

barreau par celles obtenues sans barreau. La moyenne de ce multiplicateur est 19.2. Répétant la même expérience avec la bobine à gros fil comme bobine secondaire, nous obtenons le tableau suivant :

Distance de la bobine secondaire à gros fil	Déviations avec le barreau de fer doux	Déviations sans barreau	Pouvoir multiplicateur du barreau
60	74	4	18.5
50	85	4.5	18.8
40	96	5	19.2
30	105	5.5	19
20	117	6	19.5

Le multiplicateur moyen est ici 19.

Cette expérience nous montre que la *quantité* du courant induit augmente considérablement par l'introduction d'un barreau de fer doux dans la bobine primaire. Elle devient 19 fois plus grande pour notre appareil.

En nous basant sur ces résultats, il pourrait paraître rationnel d'en conclure que l'*intensité* lue à l'électrodynamomètre sera également multipliée par 19 en introduisant dans la bobine primaire le barreau de fer doux.

Nous pourrions nous y attendre d'autant plus que nous avons constaté précédemment l'*augmentation parallèle de la quantité et de l'intensité* pour d'autres moyens de graduation (augmentation du courant inducteur, rapprochement des bobines, diminution de résistances non inductives dans le circuit). Or, nous avons trouvé à la suite de nombreuses expériences que l'intensité n'est que 4 fois plus grande avec le barreau de fer doux que sans celui-ci. Exemple :

Distance des bobines	Intensité avec le barreau de fer doux	Intensité sans barreau
112	9.69	2.33
100	14.07	3.53

Le pouvoir multiplicateur du barreau est donc de 3.9 et de 4.1, soit en moyenne de 4.

Cette discordance entre la quantité et l'intensité s'explique facilement par la naissance dans le barreau de fer doux des courants dits de Foucault, naissant à la fermeture et à l'ouverture du circuit primaire et qui s'opposent à l'établissement du courant induit; à ces courants, au développement desquels le circuit bon conducteur du barreau offre un milieu favorable, s'ajoutent encore les phénomènes d'hystérésis, c'est-à-dire l'aimantation et la désaimantation plus ou moins lentes du barreau de fer doux. Ces deux facteurs n'ont aucune influence sur la *quantité*, mais aplatisent la courbe du courant en abaissant son *intensité*.

Dans les appareils d'induction ordinaires, la bobine primaire renferme un faisceau de fils de fer doux, séparés les uns des autres par un vernis isolant, ou par la couche d'oxyde de leur surface; dans ce milieu cloisonné, la naissance des courants de Foucault est gênée et les aimantations et désaimantations successives se font avec plus de rapidité.

Nous exposons dans le tableau suivant les modifications que subit la quantité par l'emploi d'un faisceau de fils de fer doux substitué au barreau compact des expériences précédentes.

Distance de la bobine secondaire à fil fin	Déviations avec le faisceau de fils de fer	Déviations sans le faisceau de fils de fer	Pouvoir multiplicateur du faisceau
90 millim.	111	10	11.1
80 »	144	12.5	11.5
70 »	179	14.5	12.3
60 »	210	17	12.3
50 »	236	19	12.4
40 »	267	22	12.1
30 »	298	24	12.4
20 »	329	26	12.6
10 »	347	28	12.4

Le pouvoir multiplicateur est en moyenne 12.1.

Nous répétons la même expérience, mais en prenant la bobine à gros fil comme bobine secondaire :

Distance de la bobine secondaire à gros fil	Déviations avec le faisceau de fils de fer	Déviations sans le faisceau de fils de fer	Pouvoir multiplicateur du faisceau
90 millim.	29	2.5	11.6
80 »	36	3	12
70 »	44	4	11
60 »	52	4.5	11.5
50 »	59	5	11.8
40 »	66	5.5	12
30 »	73	6	12.1
20 »	78	6.5	12
10 »	83	7	11.8

Ici nous obtenons comme multiplicateur moyen 11.7; nous pouvons donc admettre, en tenant compte des deux expériences précédentes, 12 comme multiplicateur du faisceau de fils de fer doux. L'introduction de ce dernier dans la bobine primaire augmente, par conséquent, 12 fois la *quantité*; cette augmentation est inférieure à celle due à un barreau de fer doux, ce qui n'a pas lieu de nous étonner, puisque sous même volume un électro-aimant formé de fils de fer juxtaposés a nécessairement une masse moindre que lorsqu'il est fait d'une seule pièce.

Le pouvoir multiplicateur variera naturellement suivant les appareils, particulièrement suivant la masse de l'électro-aimant et la forme plus ou moins allongée des bobines. Nous trouvons dans le traité de physique de Müller les chiffres suivants pour l'appareil qu'il a employé:

sans aimant	6.5 divisions
avec un faisceau de fils de fer	45 »
avec un barreau de fer	63 »

Le chiffre multiplicateur est donc de 6.9 pour le faisceau de fils de fer, et de 9.6 pour le barreau.

Par contre, nous devons nous attendre, d'après ce que nous avons dit plus haut au sujet des courants de Foucault et des phénomènes d'hystérésis, à trouver l'intensité augmentée dans de plus fortes proportions par le *faisceau* de fils de fer doux que par le *barreau* de fer.

C'est ce que démontre clairement l'expérience résumée dans le tableau suivant:

Distance des bobines	Intensité avec le faisceau de fils de fer doux	Intensité sans le faisceau de fils de fer doux	Pouvoir multipli- cateur du faisceau
Bobine secondaire à fil fin . . . 150 mm.	11.48	1.86	6.1
Bobine secondaire à fil fin . . . 144 »	14.42	2.23	6.4
Bobine secondaire à gros fil . . 112 »	14.21	2.33	6

L'introduction du faisceau de fils de fer doux rend donc l'intensité 6 fois plus forte, tandis que le barreau de fer doux ne la multiplie que par 4 (page 31).

Il était intéressant de rechercher quelle part dans la diminution de l'intensité revient aux courants de Foucault, quelle part aux phénomènes d'hystérésis. Dans ce but, nous avons fait faire un barreau de laiton s'adaptant parfaitement à la cavité de notre bobine primaire. Dans ce milieu bon conducteur, les courants de Foucault ne rencontrent aucun obstacle à leur complet développement, tandis que les phénomènes d'aimantation et de désaimantation n'existent pas.

Pour constater la diminution de l'intensité par la naissance des courants de Foucault, nous mesurons à l'électrodynamomètre l'intensité du courant induit à divers degrés d'écartement des bobines, avec et sans barreau de laiton dans la bobine primaire. Nous obtenons les chiffres suivants :

Intensités obtenues sans le barreau de laiton	Intensités obtenues avec le barreau de laiton	Réduction de l'intensité au tant pour cent de sa valeur primitive
4.58	3.71	81 %
5.65	4.69	83 %
6	4.79	79 %
8.66	7.21	83 %
11.33	9.11	80 %
11.52	9.38	81 %
12.08	9.94	82 %
14.07	11.04	78 %

Nous voyons donc que l'introduction dans la bobine primaire du barreau de laiton réduit au 80% de sa valeur primitive l'intensité du courant induit. Par contre, au galvanomètre, les déviations restent absolument les mêmes avec ou sans barreau. La *quantité ne change pas*, l'aire de la courbe reste la même; le courant a un peu moins d'*intensité* et un peu plus de *durée*. Nous pouvons, d'après ces chiffres, nous faire une idée du rôle joué tant par les courants de Foucault que par les phénomènes d'hystérésis dans l'abaissement de l'intensité. Comme nous l'avons dit, la quantité étant 19 fois plus forte quand on introduit le barreau de fer doux, l'intensité, si rien ne s'y opposait, devrait croître dans les mêmes proportions; or, à l'aide de la mesure dynamométrique, nous avons trouvé le chiffre 4 comme multiplicateur de l'intensité. L'expérience, avec le barreau de laiton, nous montre ce que l'intensité peut perdre par la naissance des courants de Foucault, elle perd le 20 %. Nous aurions donc, s'il fallait tenir compte de ceux-ci seulement, le chiffre 15 au lieu de 19 comme

multiplicateur; le reste de la diminution de l'intensité jusqu'au 20 % de sa valeur primitive dépendrait donc des phénomènes d'hystérésis. Avec le faisceau de fils de fer doux, ces obstacles sont diminués, mais n'en existent pas moins, sans que nous puissions déterminer la part qui revient à l'un et à l'autre.

L'intensité est encore réduite de 12, chiffre qu'elle devrait avoir si l'intensité croissait dans les mêmes proportions que la quantité, à 6; elle tombe au 50⁰ %. Avec l'emploi du faisceau de fils de fer, les obstacles dûs aux courants de Foucault et aux phénomènes d'hystérésis sont donc notablement diminués, mais ils existent encore au point de réduire de moitié l'intensité du courant.

La constatation des résultats obtenus avec le barreau de laiton nous amène tout naturellement à l'étude du tube de Duchenne, dont l'influence sur la quantité et l'intensité est absolument semblable à celle du barreau de laiton.

SIXIÈME PROPOSITION.

L'introduction du tube de Duchenne entre les deux bobines modifie l'intensité sans rien changer à la quantité des courants induits.

Nous employons pour cette expérience un petit appareil d'induction Trouvé où la graduation du courant induit se fait uniquement par l'introduction d'un tube de cuivre entre la bobine primaire et secondaire. La fermeture et l'ouverture du courant inducteur font naître dans la bobine secondaire et dans le tube de cuivre des courants induits, de même sens dans ces deux conducteurs; ceux-ci à leur tour par influence mutuelle agissent l'un sur l'autre; ainsi, le courant induit dans le tube de cuivre est de même sens que celui que le courant primaire fait naître dans la bobine secondaire, il tend, par conséquent, en sa qualité de courant nais-

sant, à provoquer dans la bobine secondaire un courant induit de sens inverse au premier et aplatit ainsi la courbe.

La connaissance de ces phénomènes d'induction mutuelle, dont le tube de Duchenne est le siège, nous permet de prévoir quelle modification il apportera à la quantité et à l'intensité. Nous venons, en effet, de dire que cette influence se réduit à l'aplatissement de la courbe du courant induit, d'où nous pouvons conclure que l'intensité moyenne sera diminuée, tandis que la quantité ne subira aucune modification. C'est ce que confirment du reste nos expériences.

Que le tube de Duchenne soit complètement enfoncé, à son maximum d'effet, ou complètement retiré, la *déviatiou galvanométrique* reste la même, la *quantité* ne change pas. A l'électrodynamomètre, par contre, nous trouvons une augmentation progressive de l'intensité à mesure que nous retirons le tube.

	Intensité mesurée	% de l'intensité
Tube complètement enfoncé . .	8.83	80.6
» retiré jusqu'à la division 1	9	82
» » » » » 2	9.16	83
» » » » » 3	9.27	84
» » » » » 4	9.40	85
» » » » » 5	9.64	88
» » » » » 6	9.79	89
» » » » » 7	10.29	92
» » » » » 8	10.41	94
» » » » » 9	10.58	96
» » » » » 10	10.71	98
» » » » » 11	10.95	100
» » » » » 12	10.95	100

Nous voyons l'augmentation progressive de l'intensité à mesure que nous réduisons, en le retirant, l'action modératrice du tube. Si nous donnons les intensités en pour cent de l'intensité maximale, nous constatons que l'introduction du tube de Duchenne réduit l'intensité au 80 %, réduction égale à celle que nous avons vu précédemment être produite par l'introduction du barreau de laiton dans notre appareil Dubois-Reymond.

SEPTIÈME PROPOSITION.

L'intercalation d'un condensateur en dérivation des points de rupture du circuit primaire agit d'une manière analogue à la rupture faite au mercure sous couche d'alcool. L'intensité du courant d'ouverture est augmentée sans que la quantité change.

La première chose qui frappe quand nous plaçons un condensateur dans les conditions que nous venons d'indiquer, est la disparition de l'étincelle très vive que, dans les conditions habituelles, nous voyons jaillir entre les points de rupture du circuit inducteur; cette étincelle est due à l'extra-courant qui, grâce à sa haute tension, franchit sous forme d'étincelle la couche d'air entre les points de contact au moment de l'ouverture du courant primaire.

Or, nous avons vu plus haut que c'est justement cette étincelle qui, en volatilissant les métaux à leurs points de contact et jouissant d'une certaine conductibilité, est en partie cause de la prolongation de l'état variable descendant. En supprimant cette étincelle, nous donnons à la période d'état variable toute la brusquerie dont elle est susceptible, nous élevons le sommet de la courbe de décharge, tout en lui conservant son aire,

autrement dit sa quantité. Ces vues purement théoriques se trouvent pleinement justifiées par l'expérimentation.

Soit notre appareil d'induction. Nous plaçons un condensateur de 1 Microfarad en dérivation des points de rupture, comme le montre la figure V. Dans le circuit secondaire, nous intercalons l'électrodynamomètre

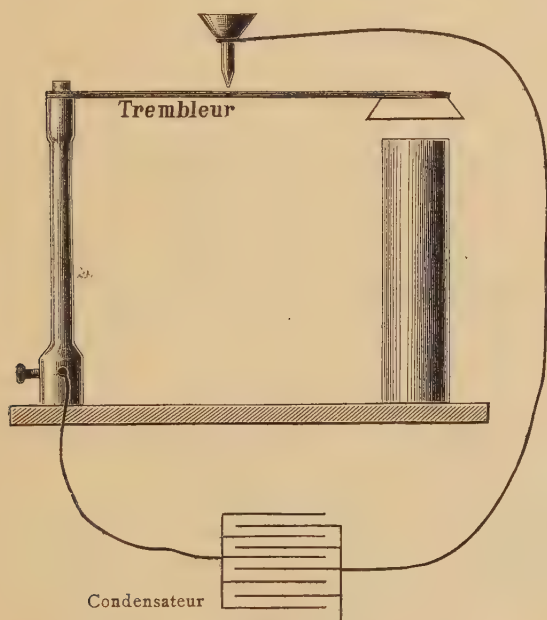


Fig. V.

et une résistance non inductive de 1000 ohms. La bobine primaire contient soit le faisceau de fils de fer, soit le barreau de fer doux, soit celui de laiton.

Distance de la bobine secondaire à fil fin	Intensité sans condensateur	Intensité avec condensateur	Pouvoir multiplicateur du condensateur
La bobine primaire contient le faisceau de fils de fer doux			
160	5.38	10.39	1.94
150	7.93	14.83	1.86
La bobine primaire contient le barreau de fer doux			
150	7.74	8.48	1.09
140	12.08	13.41	1.11
La bobine primaire ne contient pas de noyau de fer doux			
120	4.79	5.65	1.18
110	7.28	8.66	1.18
La bobine primaire contient le barreau de laiton			
100	9.69	9.94	1.02
90	12.32	12.84	1.04

Nous répétons la même expérience avec la bobine à gros fil comme bobine secondaire.

Distance de la bobine secondaire à gros fil	Intensité sans condensateur	Intensité avec condensateur	Pouvoir multiplicateur du condensateur
La bobine primaire contient le faisceau de fils de fer doux			
160	5.83	11.18	1.91
150	8.30	14.49	1.80
La bobine primaire contient le barreau de fer doux			
140	7.93	8.48	1.06
130	12.28	13.11	1.06

Distance de la bobine secondaire à gros fil	Intensité sans condensateur	Intensité avec condensateur	Pouvoir multiplicateur du condensateur
La bobine primaire ne contient pas d'électro-aimant			
120	4.79	8.18	1.70
110	6.71	11.74	1.74
La bobine primaire contient le barreau de laiton			
90	9.21	11.14	1.29

L'augmentation de l'intensité par l'intercalation d'un condensateur en dérivation des points de rupture ressort clairement de ces deux expériences.

En divisant les intensités obtenues avec condensateur par celles obtenues sans condensateur, nous trouvons son pouvoir multiplicateur. Les chiffres n'oscillent qu'entre 1 et 2; ils varient suivant que la bobine primaire contient le faisceau de fils de fer, le barreau de laiton ou de fer ou que l'induction se fait par le courant seul. Ils varient également suivant qu'on a à faire à la bobine à gros fil ou à fil fin.

Avec le faisceau de fils de fer, on trouve pour les deux bobines le même chiffre multiplicateur, *l'intensité est presque doublée par le condensateur*; par contre, sans noyau de fer doux il se trouve être plus fort pour la bobine à gros fil, il en est de même en introduisant le barreau de laiton dans la bobine primaire. Par l'emploi du barreau de fer doux, le pouvoir multiplicateur est le même pour les deux bobines, il n'est que de 1.06 à 1.11, c'est-à-dire que l'intensité est à peine augmentée.

Il serait intéressant de rechercher les causes de ces divergences, mais nous ne pouvons aborder ici ce sujet.

EXPÉRIENCES PHYSIOLOGIQUES.

Nous avons ainsi terminé, à l'aide du galvanomètre et de l'électrodynamomètre, l'étude des modifications que subissent la quantité et l'intensité du courant induit par l'emploi de tel ou tel moyen de graduation.

Il nous reste à exposer l'influence qu'ont sur l'effet physiologique les modifications constatées de la quantité et de l'intensité. Il est superflu de démontrer que l'action physiologique croît avec l'intensité du courant inducteur, avec le rapprochement des bobines, avec la suppression de résistances intercalées dans le circuit; nous avons vu la différence qu'il faut faire entre les résistances non inductives qui diminuent à la fois la quantité et l'intensité et les résistances solénoïdes qui, par leur résistance apparente, réduisent l'intensité seule.

Nous avons déjà montré que multiplier les spires des bobines ne rend pas toujours l'action physiologique plus forte. Suivant les conditions de résistance du circuit, il faut avoir recours à des bobines à fil fin de haute tension, ou à des bobines à gros fil de tension moindre. Nous avons vu que l'action physiologique peut être plus forte avec une bobine à gros fil, c'est-à-dire avec un courant qui a moins de tension (nombre de tours), moins de quantité (mesurée au galvanomètre), mais qui a plus d'intensité moyenne (mesurée à l'électrodynamomètre). Nous savons que ce sont les phénomènes de selfinduction qui expliquent ces faits paradoxaux.

Nous n'avons donc pas à examiner l'action physiologique pour ces quatre modes de graduation des courants. Par contre, il est intéressant de rechercher quelle différence il y a entre le courant de fermeture (courant inverse) et le courant d'ouverture (courant direct) d'une bobine suivant que l'induction se fait :

- 1° sans électro-aimant,
- 2° avec un barreau de fer doux,
- 3° avec un faisceau de fils de fer doux,
- 4° avec un barreau de laiton.

Enfin, il nous reste à préciser 5° l'action d'un condensateur en dérivation des points de rupture.

Toutes ces expériences ont été faites dans des conditions identiques à l'aide de notre appareil à chariot actionné par 4 Daniells, tantôt avec la bobine secondaire à fil fin, tantôt avec la bobine à gros fil. Le pôle positif (anode) est placé sur la nuque, sous la forme d'une plaque d'étain, le pôle négatif (Kathode) est fixé sur le nerf médian au poignet et nous notons exactement en millimètres à quelle distance des bobines apparaît la première contraction visible tant à la fermeture qu'à l'ouverture du courant. Ces fermetures et ouvertures se font soit à l'aide d'une clef de Morse soit à l'aide d'un contact à mercure. Les traités de physique et de physiologie attribuent au courant d'ouverture une grande prédominance d'action sur celui de fermeture. La naissance dans le circuit primaire de l'extra-courant de fermeture rend la période d'état variable plus longue et abaisse l'intensité du courant induit de fermeture et l'on donne à ces deux courants le schéma suivant (fig. VI):

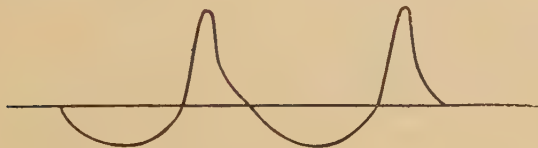


Fig. VI.

D'après nos expériences, *cette prédominance d'action du courant d'ouverture ne se montre que dans le cas où l'induction se fait à la fois par la naissance et la*

cessation du courant inducteur et par l'aimantation et la désaimantation d'un noyau de fer doux; et c'est dans ces conditions de double induction que ces appareils sont généralement employés. Si on supprime le noyau de fer doux (faisceau de fils ou barreau), on n'observe plus cette action plus forte du courant d'ouverture. Les deux contractions de fermeture et d'ouverture s'obtiennent à peu près aux mêmes distances des bobines. Tantôt on observe l'égalité complète des deux courants, tantôt, si la rupture est brusque (mercure), on constate une légère prédominance du courant d'ouverture, souvent enfin on trouve au contraire une légère prédominance du courant de fermeture, comme le montre le tableau suivant :

	La première contraction d'ouverture apparaît	La première contraction de fermeture apparaît
La bobine secondaire à fil fin étant à	104 mm.	104 mm.
La bobine secondaire à fil fin étant à	103 »	109 »
La bobine secondaire à fil fin étant à	94 »	94 »
La bobine secondaire à gros fil étant à	115 »	117 »
La bobine secondaire à gros fil étant à	111 »	111 »

La différence que nous observons dans les chiffres donnant le degré d'un emboîtement de la bobine secondaire au moment où apparaît la première contraction d'ouverture ou de fermeture provient de ce que les

expériences résumées dans le tableau précédent ont été faites à différentes époques, tantôt sur M. le D^r Dubois, tantôt sur nous-même. Les conditions de résistance du circuit étant naturellement différentes pour les différentes expériences, les variations des chiffres indiquant la distance des bobines se trouvent suffisamment expliquées soit pour l'expérience précédente, soit pour celles que nous allons exposer.

Nous constatons donc que, lorsque l'induction se fait sans *électro-aimant* dans la bobine primaire, les obstacles qui s'opposent à l'ascension brusque du courant de fermeture (extra-courant) ne sont pas plus forts que ceux qui diminuent l'intensité du courant d'ouverture (prolongation du courant par l'étincelle conductrice, extra-courant, etc.) et le schéma des courants pourra être figuré ainsi (fig. VII) :

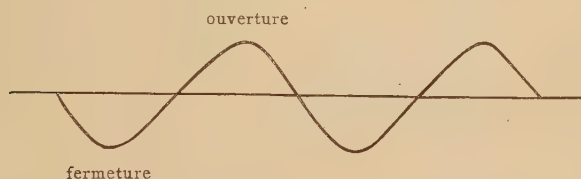


Fig. VII.

En introduisant dans la bobine primaire le barreau de laiton, nous obtenons les mêmes résultats. Ici encore les deux courants ont presque la même action, tantôt légèrement plus forte à la fermeture, tantôt égale à la fermeture et à l'ouverture suivant la brusquerie fortuite des fermetures et des ouvertures; seulement nous devons augmenter le rapprochement des bobines pour obtenir la première contraction, conformément à ce que nous avons constaté précédemment, que la présence du barreau de laiton diminue l'intensité sans modifier la quantité.

	La première contraction d'ouverture apparaît	La première contraction de fermeture apparaît
La bobine secondaire étant à	99	105
» » » » »	90	97
» » » » »	98	98

Le schéma des deux courants reste donc le même, sauf que le barreau de laiton aplatis encore légèrement la courbe, prolongeant la durée aux dépens de l'intensité.

Tout autres sont les résultats si nous introduisons dans la bobine primaire un barreau de fer doux.

	La première contraction d'ouverture apparaît	La première contraction de fermeture apparaît
La bobine secondaire étant à	152	46
» » » » »	153	68
» » » » »	145	59

Comme nous le montre le tableau, l'action du courant d'ouverture est favorisée, on obtient la contraction minimale à une plus grande distance des bobines. Par contre, le *courant de fermeture* perd beaucoup de son intensité et il faut rapprocher les bobines jusqu'à 46, 68 et 59 millimètres pour obtenir une contraction que le *courant d'ouverture* donne à des distances de 152, 153 et 145 millimètres. Avec le barreau de fer doux le schéma des courants de fermeture et d'ouverture serait le suivant:

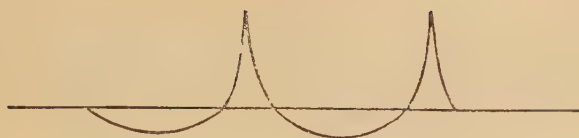


Fig. VIII.

Le courant de fermeture est presque annulé, tandis que le courant d'ouverture devient plus intense mais plus court.

En substituant un faisceau de fils de fer doux au barreau de fer, nous diminuons comme nous l'avons vu les courants de Foucault et les phénomènes d'hystérésis; la courbe représentant le courant de fermeture subira par conséquent un aplatissement moindre, la contraction minimale apparaîtra à un rapprochement moindre des bobines.

	La première contraction d'ouverture apparaît	La première contraction de fermeture apparaît
La bobine secondaire étant à	156	112
» » » » »	157	125

Nous voyons, par contre, que le courant d'ouverture devient plus intense et produit la première con-

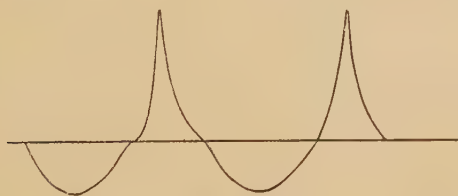


Fig. IX.

traction au maximum d'écartement. Le schéma ci-joint (fig. IX) donne la courbe de ces deux courants.

Le condensateur en dérivation des points de rupture n'est pas employé en physiologie; il est utilisé dans les bobines Ruhmkorff pour donner au courant d'ouverture son maximum de tension.

Lorsque nous plaçons un condensateur dans les conditions que nous venons de dire, il n'y a lieu, au point de vue physiologique, de ne tenir compte que des courants d'ouverture, ceux de fermeture ne se trouvant nullement modifiés par cette disposition: par le fait que la rupture du courant primaire devient plus franche, plus brusque, le courant d'ouverture gagne en intensité. Les expériences suivantes donnent les résultats que nous avons obtenus en plaçant un condensateur en dérivation des points de rupture du circuit primaire (voir fig. V). La bobine à fil fin remplit les fonctions de bobine secondaire.

	Première contraction d'ouverture	
	sans condensateur	avec condensateur
La bobine primaire contient le faisceau de fils de fer . . .	à 145 mm.	à 153 mm.
La bobine primaire contient le barreau de fer	à 141 »	à 145 »
La bobine primaire ne contient pas d'électro-aimant. . .	à 95 »	à 108 »
La bobine primaire contient le barreau de laiton	à 88 »	à 98 »

Ces résultats ne nous surprennent guère après les mesures électrodynamométriques que nous avons faites, aussi n'insistons-nous pas plus longuement.

Nous répétons cette expérience, mais avec la bobine à gros fil comme bobine secondaire:

	Première contraction d'ouverture	
	sans condensateur	avec condensateur
La bobine primaire contient le faisceau de fils de fer . .	à 130 mm.	à 123 mm.
La bobine primaire contient le barreau de fer	à 125 »	à 121 »
La bobine primaire ne contient pas d'électro-aimant. . .	à 109 »	à 111 »
La bobine primaire contient le barreau de laiton	à 92 »	à 96 »

Nous voyons ici un phénomène paradoxal se produire, c'est-à-dire une *diminution de l'effet physiologique par l'intercalation d'un condensateur en dérivation des points de rupture* lorsque la bobine primaire renferme le barreau ou le faisceau de fils de fer doux et une augmentation très faible sans aimant ou avec le barreau de laiton.

Ce résultat, auquel nos mesures électrodynamométriques ne nous avaient guère préparés, nous surprit beaucoup tout d'abord; de nombreuses expériences nous donnant toujours le même résultat, il ne pouvait plus persister aucun doute au sujet de la valeur de ces expériences.

Cette exception, *diminution de l'action physiologique par le condensateur en dérivation*, ne se présente qu'avec la bobine à gros fil et dans les conditions où le courant de cette bobine a le plus d'intensité (barreau ou faisceau de fils de fer doux). Ce courant a déjà, nous le savons par le fait même qu'une bobine à gros fil a moins de selfinduction, une *grande intensité dynamométrique*, c'est un courant très intense, mais de très

courte durée. En élevant encore son *intensité* aux dépens de sa *durée* par l'intercalation d'un condensateur, on diminue l'action physiologique, le *flux électrique est trop instantané*. L'expérience faite en intercalant dans le circuit simultanément le corps et l'électrodynamomètre confirme entièrement ces vues. Les déviations dynamométriques deviennent *plus grandes* et pourtant l'effet physiologique *diminue*.

Il suffit d'intercaler dans le circuit une résistance solénoïde de 400 ou de 1000 ohms de résistance ohmique pour ralentir ce flux. Alors on se retrouve dans les conditions de la bobine à fil fin et l'intercalation d'un condensateur *augmente l'effet physiologique*. Ce phénomène vient confirmer une opinion émise par le D^r Dubois dans son travail sur l'action physiologique des courants et décharges électriques où il dit: «Mais il est probable que si nous réussissions à réduire la durée du courant à une certaine limite, nous arriverions à diminuer l'effet physiologique, peut-être même à le supprimer malgré une tension énorme, ou, répétons-le, en fonction de la résistance une intensité considérable. Ces vues théoriques sur l'action des courants trouvent leur analogie dans d'autres domaines physiologiques, par exemple dans l'action de la lumière sur la rétine. Ainsi, nous voyons très bien la balle d'une arme à feu au repos; l'intensité des rayons lumineux que dans un certain éclairage elle envoie à notre rétine est suffisante pour l'exciter, mais si le projectile passe devant nos yeux à sa sortie du canon, nous ne le voyons pas. L'*intensité* des rayons lumineux est la même, mais le phénomène a une *durée* trop courte.» Si nous avions disposé de résistances solénoïdes variables, nous aurions pu parvenir à en trouver une qui, intercalée dans le circuit, eût rendu la contraction apparente à distances égales de la bobine secondaire,

que l'on place ou non un condensateur en dérivation des points de rupture. Nous espérons, par cette explication, avoir levé tous les doutes au sujet de ce résultat paradoxal.

L'intercalation du condensateur donne sensiblement les mêmes résultats que la couche d'alcool sur un contact à mercure. Cette dernière supprime ou diminue l'étincelle de rupture, donne au courant d'ouverture son maximum de tension, donc en fonction de la résistance son maximum d'intensité. Avec le condensateur, cependant, l'effet est plus complet, plus régulier.

Les mesures effectuées à l'aide de notre électrodynamomètre nous ont montré que cet instrument permet de reconnaître toutes les variations d'intensité que subit le courant induit. Il la signale non seulement quand il se produit une augmentation parallèle de l'intensité et de la quantité, mais encore quand l'intensité est seule à varier. Il décèle toutes les modifications de la courbe des intensités, qu'elles soient produites par l'intercalation d'un solénoïde dans le circuit, par des phénomènes d'induction mutuelle ou par des procédés favorisant la rupture du courant inducteur (condensateur).

Ces qualités semblent faire de l'électrodynamomètre l'instrument de mesure des effets physiologiques, et on pourrait se demander si, intercalé dans le circuit des appareils d'induction, il ne pourrait pas nous rendre les mêmes services que le galvanomètre pour les courants galvaniques. Il mesurerait l'intensité des courants alternatifs de nos appareils, comme le galvanomètre indique en milliampères l'intensité des courants continus. L'emploi de l'électrodynamomètre dans ce but n'est possible que dans certaines limites.

Certes, pour les décharges d'induction, l'effet physiologique dépend avant tout de l'intensité ou plutôt

de la rapidité avec laquelle le courant atteint son intensité maximale et, à ce point de vue, nous pouvons nous fier aux indications de l'électrodynamomètre. Mais ce n'est pas tout. Pour qu'une décharge ait un effet physiologique, il faut qu'elle ait à la fois une certaine *intensité* et une certaine *quantité*. Les recherches du Dr Dubois sur les décharges de condensateurs ont montré que, dans certaines limites, un *excès de quantité* peut suppléer à un *défaut d'intensité* et vice versa. On peut donc admettre *a priori* qu'un courant d'induction qui a une forte quantité galvanométrique pourra donner la contraction avec une intensité dynamométrique moindre. C'est ce que nous démontre aussi l'expérience suivante :

Nous intercalons dans le circuit le corps humain et l'électrodynamomètre et nous notons l'intensité nécessaire pour produire la contraction minimale : 1° sans électro-aimant, 2° avec le barreau de fer, 3° avec le faisceau de fils de fer doux. Nous trouvons les chiffres suivants :

sans électro-aimant	11.22
avec le barreau de fer doux . .	8.88
avec le faisceau de fils de fer .	9.88

Nous constatons ainsi que sans électro-aimant il faut une intensité plus forte ; tandis que les courants produits avec électro-aimants provoquent la contraction à un chiffre plus bas d'intensité dynamométrique. C'est que ces courants ont une plus grande quantité, 20 fois (pour le barreau) et 12 fois (pour le faisceau de fils de fer) plus grande que celle que fournit l'induction par le courant seul ; c'est ce qui nous explique également pourquoi il faut une plus grande intensité avec le faisceau de fils de fer doux qu'avec le barreau.

L'électrodynamomètre pourra servir à la mesure de l'action physiologique dans toutes les conditions où la

graduation se fera sans imprimer à la quantité et à l'intensité des modifications différentes, c'est-à-dire dans tous les cas où la quantité et l'intensité varient dans les mêmes proportions (augmentation d'intensité du courant inducteur, rapprochement des bobines, résistances ohmiques dans le circuit) et dans tous ceux où la quantité restant constante, l'intensité seule varie (barreau de laiton, tube de Duchenne, solénoïde dans le circuit).

Par contre, ces indications seront inexactes et ne seront pas proportionnées à l'effet physiologique quand on recourra à un électro-aimant pour renforcer le courant

Pratiquement, cet emploi de l'électrodynamomètre n'est pas encore possible. Les instruments actuels sont faits pour le laboratoire, ils sont d'un maniement délicat et exigent de la part de celui qui s'en sert une certaine habileté manuelle.

Un électrodynamomètre approprié à la mesure des courants faradiques en physiologie devrait réunir les qualités suivantes :

- 1° Etre d'un maniement commode.
- 2° Etre assez sensible pour donner de bonnes déviations avec les courants relativement faibles qui donnent la contraction minimale.
- 3° Avoir un certain degré d'apériodicité.
- 4° N'avoir pas trop de résistance afin de ne pas trop affaiblir le courant et de ne pas donner lieu par son intercalation dans le circuit à des phénomènes de selfinduction trop intenses.

Cet instrument est encore à construire, mais nous estimons que ce serait là le seul moyen de mesurer les courants faradiques.

Les graduations en Volts et en Microcoulombs n'ont qu'une valeur relative, car elles ne tiennent pas

compte des résistances du circuit. Le galvanomètre dans le circuit n'indique que la quantité et ne peut être employé qu'à la mesure de décharges isolées. Pour avoir un degré de sensibilité suffisant, il doit avoir un grand nombre de tours et acquiert ainsi une résistance gênante. Seul l'électrodynamomètre mesure les courants alternatifs en tenant compte de toutes les résistances ohmiques et apparentes.

CONCLUSIONS.

Parmi les sept moyens que nous avons passés en revue pouvant modifier l'action des courants faradiques, il en est trois qui augmentent parallèlement et dans les mêmes proportions la *quantité* et l'*intensité* et qui agissent dans le même sens sur le courant de fermeture et sur celui d'ouverture, ce sont :

- 1° L'augmentation du courant inducteur.
- 2° Le rapprochement des bobines.
- 3° La diminution des résistances ohmiques du circuit.

Par contre, l'intercalation de résistances solénoïdes ne modifie la *quantité* qu'en raison inverse de la résistance ohmique, l'*intensité*, au contraire, en raison inverse de la somme des résistances ohmique et *apparente* due à la selfinduction.

L'introduction du tube graduateur de Duchenne ou d'un barreau de laiton diminue l'intensité tant à la fermeture qu'à l'ouverture du courant. Pour nos instruments, l'*intensité* est réduite au 80 % (courants de Foucault) de sa valeur maximale, tandis que la *quantité* reste la même.

L'introduction du barreau de fer doux augmente considérablement la *quantité* des courants de fermeture

et d'ouverture. Pour l'appareil à chariot dont nous nous sommes servis, la quantité est 20 fois plus forte que sans électro-aimant, l'*intensité*, par contre, ne devient que 4 fois plus forte et cette augmentation porte uniquement sur le courant d'ouverture, qui devient seul actif.

Le courant de fermeture, au contraire, est presque annihilé.

L'*introduction du faisceau de fils de fer* dans la bobine primaire augmente moins la *quantité*, elle devient 12 fois plus forte, tandis que l'*intensité* croît plus que pour le barreau de fer doux, elle est 6 fois plus forte que sans électro-aimant. La différence entre le courant de fermeture et celui d'ouverture est moins accentuée qu'avec le barreau, mais le courant d'ouverture conserve une grande prédominance d'action.

L'*intercalation d'un condensateur* comme la *rupture à mercure sous couche d'alcool* donne au courant d'ouverture seulement son maximum d'intensité dynamométrique et son maximum d'action physiologique. Cet accroissement d'intensité qui, la quantité restant la même, ne peut se faire qu'en raccourcissant la durée du courant, *favorise l'action physiologique dans presque tous les cas*. Le fait est constant avec la bobine à fil fin qui est le siège d'une forte selfinduction, ou quand on intercale dans le circuit des résistances solénoïdes. Par contre, avec la bobine à gros fil, dont le courant est déjà caractérisé par une grande intensité et une courte durée, le condensateur peut, en accélérant le flux, diminuer l'action physiologique.

Au point de vue pratique, trois seulement de ces moyens de graduation sont employés :

- 1° *Rapprochement des bobines* dans les appareils à chariot. C'est le moyen le meilleur. Nous avons vu

qu'il modifie proportionnellement la *tension*, la *quantité* et l'*intensité* des courants. C'est aussi le seul moyen qui permette de réduire l'action physiologique au point où elle n'est plus perçue, qui donne le moyen, pour ainsi dire, de graduer de 0 à l'intensité maximale.

2° *Tube graduateur de Duchenne* employé le plus souvent comme unique moyen de graduation dans les appareils transportables de construction française. Ce moyen est commode, permet de donner aux appareils un petit volume. Le tube de Duchenne laisse la *quantité* intacte, il ne réduit que l'*intensité* du courant, mais il a le défaut de la réduire dans des proportions insuffisantes. Dans les appareils que nous avons examinés, il ne la réduit qu'au 80% de la valeur maximale. C'est trop peu et les médecins qui en font usage auront souvent constaté que l'intensité minimale est encore trop forte pour les besoins pratiques.

3° *Introduction d'un faisceau de fils de fer doux.* Ce moyen usité en Allemagne est bon. Il augmente dans de fortes proportions (dans notre instrument 12 fois) la *quantité*. Il rend l'*intensité* 6 fois plus grande et détermine, par conséquent, des variations étendues de l'effet physiologique.

En terminant, nous saisissons avec plaisir l'occasion qui se présente pour exprimer notre profonde reconnaissance à M. le Dr Dubois, notre beau-frère, qui nous a indiqué ce sujet de thèse et n'a cessé de nous faciliter la tâche par son aide et ses précieux conseils.

